

## CAPITULO 5

---

### RADIOACTIVIDAD Y RADIACIONES IONIZANTES.

*M.Sc.. Hugo Marengo.*

En los capítulos anteriores hemos visto en forma breve como se desarrolló históricamente el estudio de la materia en relación con la energía radiante, vimos como la radiación puede estar constituida por partículas o por ondas electromagnéticas, éstas últimas a su vez fueron analizadas en un espectro que contiene tanto las radiaciones ionizantes como las no ionizantes. Lo anterior lo podemos sintetizar en el siguiente esquema simplificado:

#### **Energía Radiante:**

- I. Corpuscular.**
  - a. electrones
  - b. positrones
  - c. neutrones
  - d. protones
  - e. partículas alfa.
  
- II. Electromagnéticas.**
  - a. Ionizantes
    - 1. Rayos X, gamma
    - 2. Cósmicos
  
  - b. No ionizantes
    - 1. Radio
    - 2. T.V.
    - 3. Microondas
  
- III. Mecánicas.**
  - a. Sonido
  - b. Ondas en estanques
  - c. Ondas en cuerdas.

En este capítulo se analiza la radiación según su naturaleza, o sea: Radiación Natural y Radiación Artificial.

Definimos como Radiaciones Naturales aquellas que siempre han estado presentes en la naturaleza y se conocen como "radiación de fondo". Existen dos componentes principales de la radiación natural de fondo, a saber: radiación terrestre y radiación extraterrestre. La primera es la que proviene de los radionucléidos que están presentes en la tierra. La segunda es la radiación proveniente del

espacio exterior, también llamada "Radiación Cósmica" y su origen exacto aún no se conoce con precisión.

Se conoce como "radioactividad" a un flujo de ondas y/o partículas que provienen de los núcleos de los átomos inestables, un mismo elemento tiene en general átomos de varios tipos que aunque químicamente no se diferencian, poseen pesos atómicos distintos debido a diferente número de neutrones en sus núcleos, recordemos que los átomos de un mismo elemento, que poseen diferente número de neutrones se denominan "isótopos". Algunas de sus estructuras nucleares son estables pero otras no lo son, por lo cual se disintegran emitiendo radiación hasta alcanzar una estructura nuclear estable o sea no radioactiva.

Es interesante notar que la radiación ionizante según se mencionó anteriormente fue primero descubierta en investigaciones con electrones acelerados por altos potenciales eléctricos en tubos al vacío. Wilhelm Conrad Roentgen, 1895 en Alemania descubre y bautiza los Rayos X. Posteriormente se descubre la radiación ionizante en elementos naturales donde siempre existió en forma de radioactividad. Como vimos en Francia en 1896 Becquerel descubre la radioactividad en compuestos de uranio. Poco después, el mismo año los esposos Pierre y Marie Curie descubren y bautizan dos nuevos elementos radioactivos en la naturaleza: el "radio" y el "polonio".

La radiación proveniente del radio y del polonio fue estudiada y clasificada en tres grupos de acuerdo con su poder de penetración:

- a) Partículas pesadas llamadas Alfa que penetran unos centímetros en el aire.
- b) Partículas livianas llamadas Beta que penetran hasta un metro en el aire.
- c) Partículas electromagnéticas que penetran varios centímetros de plomo (rayos gamma).

Posteriormente al descubrimiento de las sustancias radioactivas también se descubre que siempre ha estado llegando a la tierra otra forma de radiación invisible cuyo origen es impreciso y se les llama "Rayos Cósmicos". Estas partículas interactúan con las partículas de la atmósfera en tal forma que la radiación cósmica es mayor a mayor altitud: aproximadamente el doble a 3.000 mts. de altura sobre el nivel del mar, en las cercanías del Ecuador Terrestre.

Dichosamente las sustancias radioactivas están distribuidas muy homogéneamente en la tierra (aire, tierra y mar), siendo las zonas de mayor radioactividad muy esporádicas y rara vez alcanzan niveles peligrosos para los seres vivos.

En los últimos 40 años, el hombre ha empezado a producir artificialmente elementos radioactivos a partir de los estables, o sea isótopos radioactivos o radio-isótopos. También ha aumentado la producción de equipos emisores de radiación ionizante para la tecnología y la investigación. El balance perjuicio-beneficio para el ser humano es tema de polémicas mientras la producción sigue en aumento, en tal forma que la exposición a la población humana ha sido incrementado aproximadamente en un 20% debido únicamente a los usos médicos hasta la década de 1960. Las Centrales Atómicas generadoras de energía eléctrica, las pruebas de armas nucleares, los equipos nucleares y sustancias radioactivas para la investigación aumentan tanto la exposición crónica como el riesgo de exposición

por accidente. En un próximo capítulo se discutirá el aspecto cuantitativo sobre radiaciones ionizantes en la Protección Radiológica.

El estudio del nivel de radiación ambiental normal provee de una referencia para la protección radiológica con respecto a exposiciones ocupacionales, también permite registrar cambios de importancia y estudiar sus causas con toda exactitud y confiabilidad.

En términos generales, la radiación es la emisión por un cuerpo de ondas (energía) o partículas (materia). Las ondas son perturbaciones que se propagan en un medio cualquiera, tal como agua, aire, hierro e inclusive el vacío.

Como ejemplo de ondas en general pueden citarse el sonido, el movimiento de la superficie del agua en un estanque al caer un objeto, las ondas de radio, radiación visible, rayos X. etc.

Hemos denominado "Radiación Ionizante" a aquella radiación capaz de ionizar las moléculas o átomos de cualquier sustancia en general y. para efectos de medición se escogió el aire en condiciones atmosféricas específicas o sea temperatura y presión normales (T.P.N.) La energía por partícula o por "cuanto" necesaria para disociar las moléculas del aire, es, en promedio de 33 electrón-voltión (ev) aproximadamente, 1 ev equivale a la energía que adquiere un electrón al ser acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 voltio, lo cual permite definir con más claridad la radiación ionizante como aquella que posee energía mayor de 33 eV por partícula. En el caso de las ondas electromagnéticas (fotones) esa energía corresponde aproximadamente a la energía de los rayos ultravioleta.

Las partículas como radiación, son materia que es emitida por ciertas sustancias en condiciones específicas y la que interesa en el presente curso es la emitida por los elementos radioactivos, es decir la proveniente de los núcleos inestables de los elementos, entre los más comunes: electrones, protones, neutrones, positrones y partículas alfa.

Toda radiación, ya sea en forma de ondas o de partículas, transporta energía. La cantidad de energía transportada por la radiación puede tener teóricamente cualquier valor desde cero hasta cantidades muy grandes. Las ondas electromagnéticas radio, microondas, infrarojas, ondas visibles, ultravioletas, rayos X y gamma, viajan a velocidad constante en medios homogéneos y vimos que transportan la energía en forma de cantidades finitas o paquetes llamados "cuantos" o "fotones", la cantidad de energía que lleva cada paquete, depende de su frecuencia en tal forma que entre más alta es la frecuencia, mayor es la energía de estos paquetes. Por ejemplo los rayos X llevan mayor cantidad de energía en cada paquete (cuanto) que la que lleva los cuantos de luz, ya que su frecuencia es mayor.

Antes mencionamos que la radiación ionizante es aquella radiación cuya energía le permite ionizar el aire. El aire está compuesto principalmente por nitrógeno, oxígeno y vapor de agua en cantidades variables y la energía media para ionizarlo es aproximadamente de 33 electrón-voltios. Las radiaciones electromagnéticas (rayos X o gamma) y las partículas cargadas producen ionización por medio de sus campos energéticos que interactúan con la nube electrónica de

los átomos. Las partículas sin carga eléctrica producen ionización en forma directa, es decir por choque.

En la misma forma en que la radiación ioniza el aire, lo hace también con muchas otras sustancias, particularmente la materia viviente en todos los niveles desde subcelular hasta los organismos más complejos y no solo afecta al individuo sino también a sus descendientes al alterar las características hereditarias del mismo. Es por esto que siempre debe reducirse al mínimo posible la exposición a la radiación ionizante.

Desde su descubrimiento se vislumbraron muchas aplicaciones para la radiaciones ionizantes, especialmente en medicina, en primer lugar en diagnóstico y posteriormente en terapia de tumores malignos, en ambos casos los resultados fueron tales que en la actualidad siguen siendo utilizados en forma muy satisfactoria.

## **ATOMOS, ELEMENTOS E ISOTOPOS.**

Ya hemos mencionado como los átomos se componen de tres partículas fundamentales: una negativa, una positiva y una neutra.

El electrón es la partícula negativa y tiene una masa extremadamente pequeña.

El protón es la partícula positiva, también es muy pequeña, tiene una masa cerca de unas 2000 veces la masa del electrón.

El neutrón es una partícula sin carga eléctrica y tiene una masa casi igual a la del protón y el electrón juntos.

Vimos también que los protones y neutrones son conocidos como nucleones porque forman el núcleo de los átomos.

Normalmente el átomo es eléctricamente neutro. Los átomos de un mismo elemento tienen el mismo número de protones pero el número de neutrones puede variar para un mismo elemento. Estos se llaman "Isótopos".

El elemento Neón por ejemplo, tiene tres isótopos estables cuyos núcleos tienen todos 10 protones, 10, 11 y 12 neutrones respectivamente.

## **RADIACIONES PROVENIENTES DE LOS ATOMOS.**

Algunos átomos no son estables por lo que se denominan "Radioactivos". La razón de su inestabilidad es la relación entre neutrones y protones en el núcleo. Los núcleos de los átomos más pesados muestran mayor razón de neutrones a protones.

Cuando la razón de neutrones a protones es excesiva, el núcleo no es estable, lo cual significa que el número de protones y neutrones en general son iguales. Existen, para cada elemento isótopos estables y también isótopos inestables. Otro

aspecto notable sobre inestabilidad nuclear es que el elemento estable de mayor número atómico que existe en la naturaleza es el plomo que posee 82 protones. Todo elemento que posea más de 82 protones es radioactivo o inestable y eventualmente emite radiaciones hasta alcanzar un estado estable.

## RADIACIONES.

### a) Radiación Alfa ( $\alpha$ )

Vimos que la fuente de inestabilidad de los elementos más pesados está en la estructura del núcleo. El núcleo inestable del elemento pesado podría emitir alguna de las partículas fundamentales pero eso no sucede, lo que en realidad hace es emitir grupos de  $2p + 2n$ , con gran velocidad y a este conjunto se le llama "partículas Alfa".

Los átomos que emiten estas partículas alfa se dice que "decaen por emisión alfa". El átomo que emite una partícula alfa muta a otro elemento ya que pierde dos protones y dos neutrones. Por emisión alfa el Uranio se transforma en torio y el Radio se transforma en Radón.

### b) Radiación Beta ( $\beta$ )

Existe otro proceso por el cual el Uranio puede reducir su tamaño nuclear: puede partirse en dos fragmentos o átomos de menor tamaño. Este proceso es acelerado al "meter" otro neutrón al átomo de Uranio para que se parta en dos. Este proceso se llama "fisión" y es el proceso que constituye la base del funcionamiento de los reactores nucleares.

Los átomos producidos por la Fisión se llaman productos de fisión y se caracterizan por poseer también un exceso de neutrones respecto a sus elementos naturales. Este exceso es responsable por la inestabilidad de los productos de fisión, que son radioactivos.

Los productos de fisión ya no son tan pesados como para emitir partículas alfa ni para partirse o sea fisionarse en fracciones menores. Cómo arreglan entonces su condición de inestables?

El neutrón cuando está aislado se desintegra en un protón y un electrón. Este mismo proceso también sucede en los núcleos en los productos de fisión y cada uno de estos eventos hace que el núcleo emita un electrón en forma de partícula beta, (aún cuando en el núcleo no existan electrones) y el átomo resultante se acerca a una estructura estable hasta alcanzar una relación estable neutrones / protones.

Cada electrón emitido por el núcleo sale con cierta energía y se llama "partícula beta". Su emisión se conoce como "decaimiento beta", la partícula Beta es entonces un electrón que sale a alta velocidad del núcleo inestable.

De nuevo, como en el caso del decaimiento Alfa, el decaimiento Beta, también transforma el elemento en otro ya que aumenta el número de protones en una

unidad. Si el nuevo núcleo aún es inestable, sufre otro decaimiento beta hasta alcanzar una estructura estable. Un ejemplo de este proceso es el producto de fisión Kriptón, que pasa a Rubidio, que pasa a Estroncio, el cual finalmente se convierte en Itrium, que no es radioactivo.

### c) Radiación gamma ( $\gamma$ )

Ambos tipos de decaimiento: Alfa y Beta pueden o no estar acompañados de emisión de energía electromagnética idéntica a los Rayos X que vimos en el espectro electromagnético, a diferencia del caso de decaimiento alfa y beta, el átomo permanece pero libera energía en forma de radiación electromagnética que se denomina radiación gamma.

La radiación gamma es energía remanente o de excitación, que queda en los núcleos recientemente formados después de emisión alfa o beta.

## PRODUCCION DE RAYOS X.

Como hemos visto en 1895, Wilhelm Conrad Roentgen observó cierta fluorescencia sobre una pantalla cerca de un tubo de rayos catódicos, cuando el tubo estaba funcionando. Roentgen concluyó que el efecto era debido a la generación de rayos invisibles que penetraban materiales opacos y producían fluorescencia en ciertas sustancias químicas, bautizó esta radiación como "Rayos X" y en su honor actualmente se conocen también como "Rayos Roentgen".

Vimos también, cuando nos referíamos al Espectro Electromagnético que las ondas electromagnéticas surgen asociadas con cargas eléctricas vibrantes. La radiación electromagnética se mide en función de su energía y su longitud de onda, la primera es proporcional a la frecuencia y se mide en ciclos por segundo y la segunda se mide en metros, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 5.1.

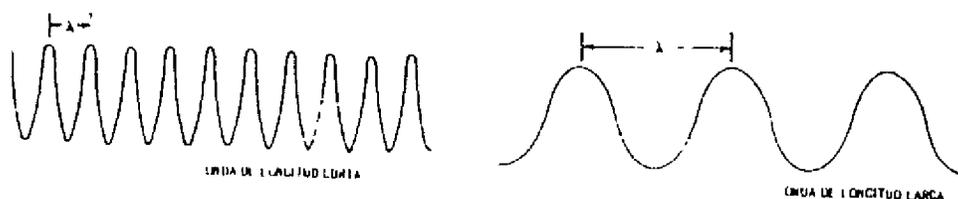


Fig. 5.1

Comparativamente, la longitud de onda de una frecuencia baja, por ejemplo 60 ciclos por segundo es de cerca de 15000 Km. La longitud de onda de los Rayos X usados en medicina son tales que caben unos mil millones de ciclos en un centímetro. Como son tan pequeños penetran la materia entre las estructuras moleculares o profundidades considerables

Los Rayos X, al igual que el resto de las radiaciones electromagnéticas poseen características ondulatorias y corpusculares, además ocupan la misma región del espectro electromagnético y no existe forma de diferenciarlos excepto por su origen. Los rayos gamma provienen del núcleo del átomo como producto de la inestabilidad nuclear. Los Rayos X se producen fuera del núcleo, en las órbitas o nube electrónica.

La fuente principal de Rayos X es el frenado de electrones veloces al chocar con la materia. Al llegar los electrones con gran energía a una barrera de cualquier sustancia, la energía de movimiento, también conocida en física como "energía cinética" se transforma en energía electromagnética en forma de paquetes que hemos denominado fotones. En este proceso, cerca del 99% de la energía cinética de los electrones se transforma en calor en el choque con la materia mientras que solo cerca de un 1% se transforma en fotones de Rayos X.

Lo anterior significa que el proceso de producción de Rayos X tiene una eficiencia de un 1%.

Si deseáramos construir un aparato emisor de Rayos X necesitamos un blanco o barrera que detenga los electrones de alta velocidad que posea ciertas propiedades:

1. Alto número atómico, porque la eficiencia aumenta con este factor.
2. Alto punto de fusión, porque las altas temperaturas funden el material.
3. Buen conductor del calor, para que este fluya y se disipe rápidamente.

#### **EQUIPO EMPLEADO PARA PRODUCIR RAYOS X.**

Para observar las propiedades de los Rayos X y utilizarlos sobre una base práctica, debe disponerse de algunos medios para su rápida generación. La fuente mayormente empleada es el tubo de Rayos X.

#### **TUBO DE RAYOS-X.**

Los componentes esenciales de un tubo de Rayos X son:

1. Una ampolla de vidrio totalmente evacuada de aire que contiene el cátodo y ánodo
2. Una fuente de electrones provenientes del cátodo.
3. Un "blanco" (o ánodo) ubicado en la trayectoria de la corriente de electrones.

La Figura 5.3 nos muestra los componentes básicos de un tubo de Rayos X y de un circuito simple.

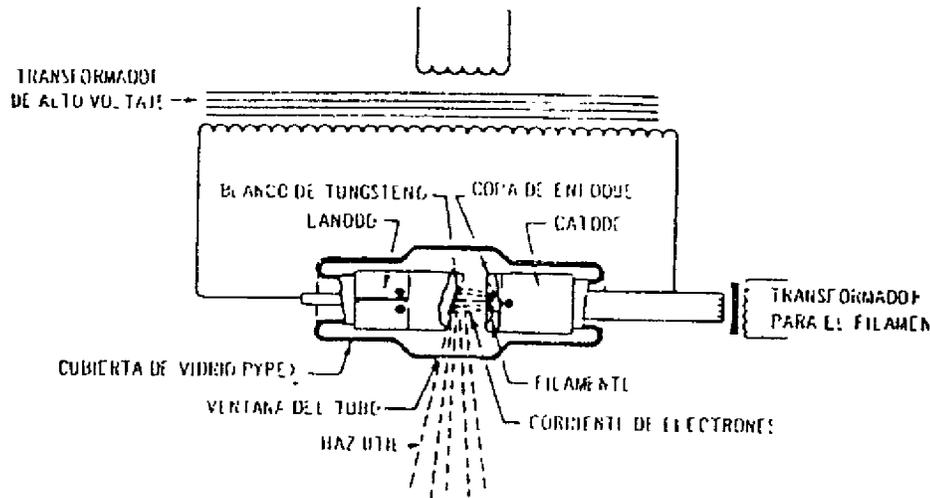


Fig. 5.3

#### ESPECTRO CONTINUO:

En todo tubo emisor de Rayos X, los electrones son acelerados por una diferencia de potencial eléctrico o voltaje directo. La energía cinética de los electrones aumenta con el voltaje aplicado. El "chorro" de electrones choca con el blanco, 99% de su energía se transforma en calor y el resto en un espectro de Rayos X.

La figura 5.2 muestra el espectro continuo de Rayos X para el tungsteno pero las características generales se mantienen para cualquier sustancia en el blanco.

La curva muestra, para cada voltaje aplicado al tubo, un valor de longitud de onda mínima para el cual se inicia la producción de Rayos X, luego, al aumentar la longitud de onda la intensidad de los Rayos X aumenta hasta alcanzar un máximo. Al área bajo la curva es una medida de la intensidad total de radiación para cada voltaje aplicado.

La intensidad total es proporcional a la cantidad de electrones que chocan con el blanco, es decir a la corriente eléctrica.

En el espectro continuo de Rayos X que sale del tubo, aparecen ciertos "picos" de emisor de Rayos X que se distinguen claramente en la curva de emisión, estos picos dependen del material del blanco y se llaman "radiación característica" o "líneas de emisión características", ya que permiten identificar el material usado

como blanco, es decir las líneas características del tungsteno difieren de las de cualquier otra sustancia.

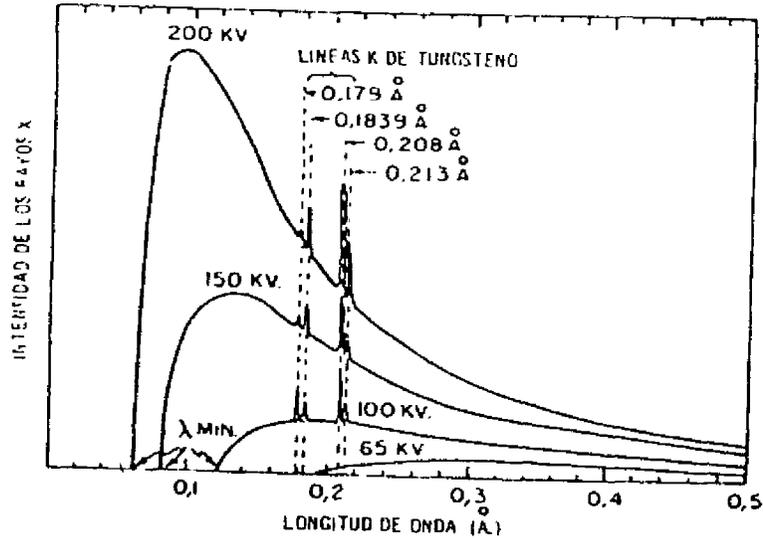


Fig. 5.2

### ABSORCION DE LOS RAYOS X.

Hemos visto que los Rayos X penetran en la sustancias. El grado de penetración depende de la energía de los Rayos X, los de más baja energía son absorbidos en las primeras capas y la radiación de mayor energía penetra más profundamente. Esto se analizará en detalle más adelante.



## CAPITULO 6

### UNIDADES Y MAGNITUDES

M.Sc. Patricia Mora

Desde el comienzo del estudio de las radiaciones ionizantes los científicos han utilizado una gran cantidad de magnitudes para describir las radiaciones. Estas magnitudes y sus correspondientes unidades a lo largo del tiempo han ido variando, creando "viejos" y "nuevos" términos, lo cual hace confusa su utilización debido a que las personas los utilizan indistintamente. En este capítulo estudiaremos cuidadosamente y de una manera muy sencilla la importancia de las magnitudes y como cada una de ellas nos brindan una información específica de las radiaciones ionizantes. Por ejemplo algunas magnitudes están asociadas a la concentración de radiación en un punto, la cantidad de radiación en el rayo, el impacto biológico que tienen estas radiaciones, etc.

Cuando tenemos una fuente de radiación pequeña o bien un haz de radiaciones provenientes de un tubo de rayos X o máquina de cobalto, se observa que las radiaciones se expanden o divergen del punto emisor. En cualquier punto a lo largo del haz, el aire cubierto por el haz es proporcional a la distancia de la fuente. Vea Fig.6.1. A una distancia de 1 metro, el ancho del haz es de una unidad, a 2 metros, el ancho es de dos unidades, a 3 metros es de tres unidades y así sucesivamente. Podemos ver que el área (el número total de "cuadrados" en la fig) para una distancia dada es igual al cuadrado de la distancia. Esto quiere decir que para una distancia de 1 metro el área es  $1 \times 1 = 1$  cuadrado, para una distancia de 2 metros el área es  $2 \times 2 = 4$  cuadrados, para una distancia de 3 metros el área es  $3 \times 3 = 9$  cuadrados.

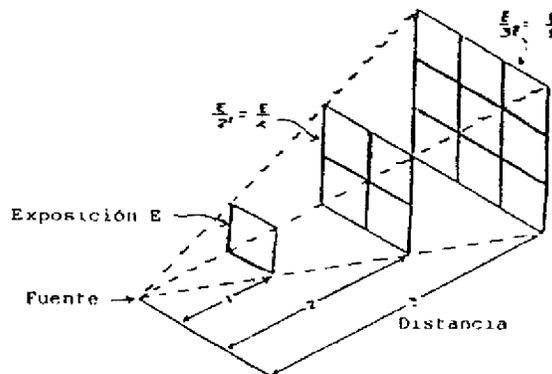


Fig. 6.1  
Ley del cuadrado inverso

Si consideramos que la cantidad de radiación que proviene de la fuente no es absorbida o removida en el espacio, entonces la misma cantidad de radiación que pasa en la primera área, pasará por las siguientes áreas. Tenemos que la cantidad total de radiación es igual para todas las áreas y no cambia con la distancia a la fuente.

Fijemos ahora nuestra atención en la concentración de radiación en las 3 diferentes áreas. En la primera área toda la radiación pasa por un cuadrado. En la segunda área, pasa por cuatro cuadrados, en la tercera pasa por nueve cuadrados. Como ya dijimos que la cantidad de radiación distribuida era la misma, la radiación está siendo menos concentrada, o bien cada cuadrado ahora recibe menos radiación. Podemos concluir que al alejarse la radiación de su fuente emisora la cantidad de radiación es la misma pero su concentración ha disminuido. La concentración de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esto se conoce como la regla del inverso del cuadrado de la distancia. Si usted se encuentra a un metro recibirá la cantidad total de radiación dividida por uno. Si se encuentra a dos metros, la cantidad que recibirá será la cantidad total dividida entre cuatro, si se encuentra a tres metros será la cantidad total dividida entre nueve, y así sucesivamente. Puede usted darse cuenta de la importancia que juega la distancia a que estemos de una fuente radioactiva, una de las principales medidas de protección radiológica es alejarse de la fuente lo más que se pueda.

#### LA ACTIVIDAD.

Una de las primeras magnitudes para cuantificar la cantidad de radiación proveniente de una fuente radioactiva es la "actividad". Ella nos dice cuantos átomos están decayendo por unidad de tiempo. La vieja unidad estaba relacionada con la desintegración del radioisótopo Radio -226, su unidad se llamaba el Curie, en honor de Madame Curie descubridora del radio. El curie se abrevia Ci. En las nuevas convenciones la actividad se mide en bequerelios, se tiene que:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Bq} &= 1 \text{ Bequerelio} = 1 \text{ d/s} \\ 1 \text{ Ci} &= 3.7 \times 10^{10} \text{ d/s} \\ \text{d/s} &= \text{desintegraciones por segundo} \end{aligned}$$

Esta cantidad por si sola no nos dice que tan peligrosa es la fuente radioactiva, pues solo nos dice cuantas desintegraciones ocurren en el núcleo por segundo. El grado de peligrosidad dependerá del tipo de radiaciones ionizantes que emita la fuente y de la energía que lleven.

#### EXPOSICION

Recordemos que existen varios tipos de radiaciones ionizantes, por ejemplo: electrones, partículas alfa, paquetes de energía (fotones) etc. Cualquiera de las anteriores, si es capaz al interactuar con un átomo y desprenderle un electrón, la llamaremos radiación ionizante.

La exposición se relaciona solo con un tipo de radiación ionizante: los fotones. Los fotones generalmente provienen de un haz de rayos X o bien del interior del

núcleo (radiación gama). Los fotones son paquetes de energía que viajan en el espacio a la velocidad de la luz y no contiene masa alguna.

La exposición es una magnitud que nos permite medir la habilidad de los fotones para producir ionización en el aire. Se define como la suma de todas las cargas positivas (o bien negativas) que producen los fotones en una unidad de masa de aire. La unidad "vieja" para la exposición es el roentgen (R), ahora se utilizan los coulombios/kilogramo. Recordemos que coulombios es la unidad de carga eléctrica, entonces lo que estamos haciendo es recolectar el número total de carga por unidad de masa (Kilogramo).

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg.}$$

La exposición medida en términos de roentgenes fue oficialmente aceptada en 1928. Se introdujo para que reemplazara a una cantidad bastante arbitraria que se usaba para medir la cantidad de radiación de un tubo de rayos X. Esta cantidad se llamaba la "dosis piel". Se medía el tiempo que tardaba la mano o el brazo bajo un tubo de Rayos X en ponerse roja. Se observaba que tan intenso era el haz por su capacidad de producir una quemadura en la piel. Esto se utilizó por 25 años hasta que se decidió tomar la medida en aire y no piel.

Otra unidad importante relacionada con la exposición es la constante gamma. La constante gamma nos da la razón de exposición (exposición por unidad de tiempo R/hora) para una fuente de 1 Ci y a 1 m de distancia. Esta unidad si nos da información de que tan peligrosa es el material radioactivo. Si conocemos la cantidad de actividad del material y a la distancia que nos encontramos de él, sabemos la cantidad de exposición la que nos veremos expuestas por unidad de tiempo.

Finalmente notemos que el concepto de exposición tiene 3 limitaciones: solo se aplica para fotones, debe ser medida en aire y la energía de los fotones no puede ser superior a 3 MeV. Todas estas limitaciones llevaron a proponer una nueva magnitud que no tuviera estos problemas, la dosis absorbida.

## DOSIS ABSORBIDA

Esta magnitud fue introducida en 1953. Ella mide la cantidad de energía entregada a una unidad de masa. Su unidad vieja era el rad (r) ahora se utiliza el Gray (Gy) Tenemos que  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$ .

En oposición a la exposición, la dosis absorbida se puede medir para cualquier tipo de radiación ionizante, con cualquier energía y en cualquier material. Cuando mencionamos una dosis absorbida de 25 rads se debe especificar en que material se llevó a cabo la medición

La importancia de esta magnitud radica en que el cuerpo humano absorbe la mayoría de la energía que proviene de las radiaciones ionizantes. Que tanto se absorbe del haz dependerá del poder de penetración de las radiaciones y de la densidad y tamaño del cuerpo al cual atraviesa. En la mayoría de las situaciones un 90% es absorbido por el cuerpo humano.

En Protección Radológica se considera que 1 rad de fotones es equivalente a una exposición de 1 R. Realmente una exposición de fotones de 1R produce una dosis absorbida en aire de 0.97 rad. Si sustituimos el aire donde se midió una exposición de 1 R por tejido humano, tendríamos una dosis absorbida de 0.95 rads. Por lo tanto usted puede decir que 1 R = 1 rad.

Al empezar a utilizar el concepto de dosis absorbida empezaron a surgir varios problemas, específicamente se comprobó que los neutrones producían más daño que los rayos X. Ambos estarían dando la misma cantidad de energía por unidad de masa (dosis absorbida) pero la manera en que esta energía es entregada en el tejido varía. Los neutrones entregan su energía más rápidamente, más concentradamente, y por eso el daño a nivel celular es mucho mayor que con Rayos X. Se decidió introducir un factor de calidad (Q) que denota el grado de efectividad biológica de la radiación. Por ejemplo los siguientes valores fueron asignados.

---

Tipos de Radiación	Valor de Q
X, beta y gamma	1
neutrones lentos	2
neutrones rápidos	10
part. alfa, fragmentos de fisión	20

---

Es importante definir que un neutrón lento es aquel que tiene una energía muy baja (0.0025 eV) y uno rápido aquel cuya energía supera el MeV. De la tabla anterior se concluye que los neutrones lentos son dos veces más "dañinos" que los rayos X y así mismo las partículas alfa son 20 veces más perjudiciales a nivel celular que los rayos X. Sabiendo esto fue necesario introducir una nueva magnitud que relacionara la dosis absorbida con el riesgo biológico de esa radiación.

#### DOSIS EQUIVALENTE

Como mencionamos anteriormente es conveniente tomar en cuenta el impacto biológico de la radiación. La magnitud física que se encarga de esto se llama la dosis equivalente (H). Las personas ocupacionalmente expuestas llevan un registro de sus dosis equivalentes para efectos administrativos y de protección radiológica.

La dosis equivalente es el producto de la dosis absorbida (D) y el factor de calidad (Q), entonces

$$H = D \times Q$$

(En la definición estricta falta un factor N pero generalmente se le da el valor de la unidad).

La unidad antigua para dosis absorbida se llama el rem cuando la dosis fue dada en rads. Como ahora la nueva unidad de dosis es el Gray (Gy) la unidad para H es el Sievert (Sv).

$$\begin{aligned} H (\text{rem}) &= D (\text{rad}) \times Q \\ H (\text{Sv}) &= D (\text{Gy}) \times Q \end{aligned}$$

La conversión de un sistema a otro es muy sencilla:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Realicemos un ejercicio numérico con estas dos últimas magnitudes estudiadas para aclararlas aún más. Cuál será la dosis equivalente de un trabajador que recibió:

- 1 R de rayos gamma,
- 1 rad de betas,
- 1 rad de neutrones lentos y
- 1 rad de partículas alfa?

Utilizando la definición de dosis equivalente debemos multiplicar la dosis absorbida por el factor Q así:

---

<i>Gamas:</i>	$1 \text{ R} \times 1 =$	1 rem
<i>Betas:</i>	$1 \text{ rad} \times 1 =$	1 rem
<i>Neutrones:</i>	$1 \text{ rad} \times 2 =$	2 rem
<i>Alfas:</i>	$1 \text{ rad} \times 20 =$	20rem
<i>Suma</i>		24 rem

---

Este valor es muy diferente al valor total de la dosis absorbida que sería:  
 $1 + 1 + 1 + 1 = 4 \text{ rads.}$

- 
- Criar e fortalecer projetos de saúde ambiental a nível das unidades da Federação e dos Municípios.
  - Fortalecer o uso, melhoramento e validação de métodos laboratoriais e estudos epidemiológicos apropriados nas avaliações de risco para a saúde, e propor métodos para avaliar a exposição a risco, perigos e benefícios para a saúde.
  - Criar um sistema para atendimento e apoio de emergências à nível nacional, promovendo a efetiva cooperação entre os diversos organismos governamentais e não-governamentais.
  - Difundir informação sobre o risco que representa para a saúde humana a exposição à substâncias químicas, baseando-se na informação e dados existentes.
  - Promover a participação e capacitação de organismos, como Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, Polícia Rodoviária, entre outros no atendimento a situações emergenciais.
  - Difundir normas e procedimentos para fabricação, transporte, armazenagem, manuseio e disposição final de substâncias químicas.

#### 6. RECURSOS FINANCEIROS

Os recursos financeiros para a implementação do Programa, serão alocados através da DNE-HSA/MS, ou por intermédio desta junto aos organismos financiadores nacionais e internacionais.

#### 7. ETAPAS

## CAPITULO 7

---

### INSTRUMENTOS PARA MEDIR LAS RADIACIONES IONIZANTES.

*M.Sc. Patricia Mora*

Las radiaciones ionizante causan una serie de cambios al interactuar con diferentes materiales. Al medir estos cambios podemos tener una idea de que tan intenso es el campo de radiación que estamos estudiando Algunos de los cambios producidos son los siguientes:

1. Ionización: liberación de pares iónicos debido a la radiación.
2. Biológico: cambios producidos en un organismo biológico debido a la radiación.
3. Químico: cambios causados en una solución química debido a la liberación de radicales libres (Un radical libre es aquel átomo que tiene un número impar de electrones).
4. Calor: la energía depositada por la radiación causa un aumento en la temperatura del medio irradiado.
5. Centelleo: la radiación causa un centelleo de luz en ciertos fósforos, (materiales que contienen el elemento fósforo).
6. Termoluminiscencia: liberación de luz después de calentar material irradiado.

La escogencia de que tipo de instrumento utilizar para cada situación particular es un poco compleja, especialmente porque se debe tomar en cuenta la relativa intensidad de la radiación y la precisión con que queremos medirla. Una idea general de las diferentes actividades y sus correspondientes instrumentos es:

---

<b>Tipo de Medida</b>	<b>Instrumento Recomendado:</b>
Exposición de R-X, Gammas	Cámara de Ionización
Exposición ambiental	Monitores de Inspección
Exposición del personal	Películas, Termoluminiscencia
Radioactividad	Detectores de Centelleo y Calibradores de Dosis

---



en la dirección de la corriente como lo indica la flecha. Mientras tanto al llegar el átomo positivo a la otra terminal, adquiere un electrón y se vuelve neutro. El electrón que desaparece de la terminal negativa es reemplazado por un electrón del circuito. La cámara de ionización bajo el efecto de las radiaciones se convierte en un conductor que permite el paso de la corriente. Para cada cámara de ionización la corriente es proporcional a la tasa de exposición. Si el instrumento está calibrado nos proporcionará una lectura en mR/hr ó R/hr.

### MEDIDAS DE EXPOSICION TOTAL

Este tipo de medición requiere de un proceso en tres etapas como se muestra en la fig. 7.2.

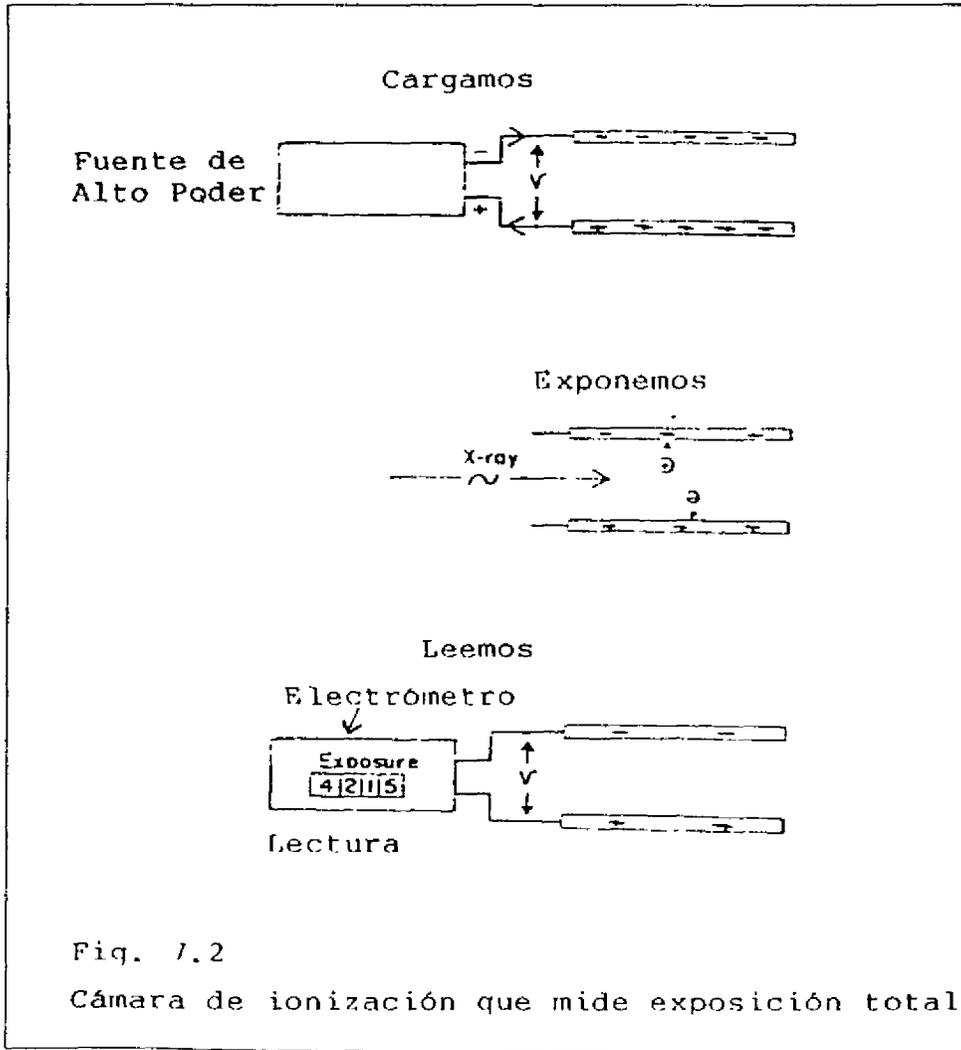


Fig. 7.2

Cámara de ionización que mide exposición total

Primero se procede a cargar los electrodos con la fuente de poder, esto debe hacerse antes de irradiar la cámara. Los electrodos quedarán cargados pues el aire es un aislante y no permite el paso de corriente de uno a otro. Después irradiamos la cámara y las radiaciones ionizantes comienzan a descargar los electrodos. La descarga ocurre debido a que los electrones viajarán hacia el electrodo positivo "neutralizando" y los átomos positivos "recogerán" un electrón del electrodo negativo. Así de esta manera la cámara se irá descargando. Por cada evento de ionización, una carga desaparecerá. Se procede finalmente a leer el voltaje que queda entre los dos electrodos, este voltaje nos indica cuanta carga se perdió. Como conocíamos el valor original de carga, ahora podemos calcular cuanta carga se perdió debido al campo de radiación. Utilizando los factores de calibración podemos obtener una lectura directamente en roentgens o miliroentgens ( R o mR ). No se recomienda que se tomen las medidas en tiempo excesivamente largos, pues factores ajenos a las radiaciones puedan ayudar a descargar la cámara, tales como la humedad en los materiales aislantes.

Las cámaras de ionización tienen varios problemas que deben discutirse. Deben aplicarse siempre correcciones de presión y temperatura debido a que las condiciones de exposición pueden variar. La cantidad de ionización depende de la energía del haz que produce la ionización. La radiación que producirá la ionización es primero absorbida por las paredes de la cámara. Por lo tanto debe tenerse en cuenta la energía del haz para introducir los factores de corrección necesarios. También debemos asegurarnos que el voltaje entre los dos electrodos sea el necesario para recolectar a todos los pares iónicos formados. Si el voltaje es insuficiente, el ion no llegará al electrodo y no será contado sobre estimando así la intensidad del haz de radiación que estamos midiendo.

#### MONITORES DE INSPECCION.

Los laboratorios que trabajan con materiales radioactivos generalmente tienen instrumental capaz de medir la exposición al personal o bien localizar y medir las actividades de una fuente radioactiva. Los instrumentos más utilizados para este tipo de medición son los monitores de inspección (survey meters). Estos monitores pueden tener varios tipos de detectores. Los más empleados son tubos Geiger-Mueller o las cámaras de ionización, pero también se puede encontrar un monitor de inspección con un detector de centelleo. Este último tiene la desventaja que es más caro, más complejo y más grande pero para ciertos casos tiene una sensibilidad mayor

#### DETECTORES GEIGER-MUELLER:

Un diagrama de la composición de un Geiger-Mueller se encuentra en la fig. 7.3. Al detector se le conoce como tubo Geiger o GM, este es un cilindro que contiene una mezcla de gas en su interior con dos electrodos. El electrodo positivo es un alambre en el eje central del cilindro, el otro electrodo es la pared interior del tubo. Al tubo se le aplica un voltaje muy alto 500-1000 V entre sus dos electrodos. El monitor también tiene un medidor de cuentas y un micrófono.

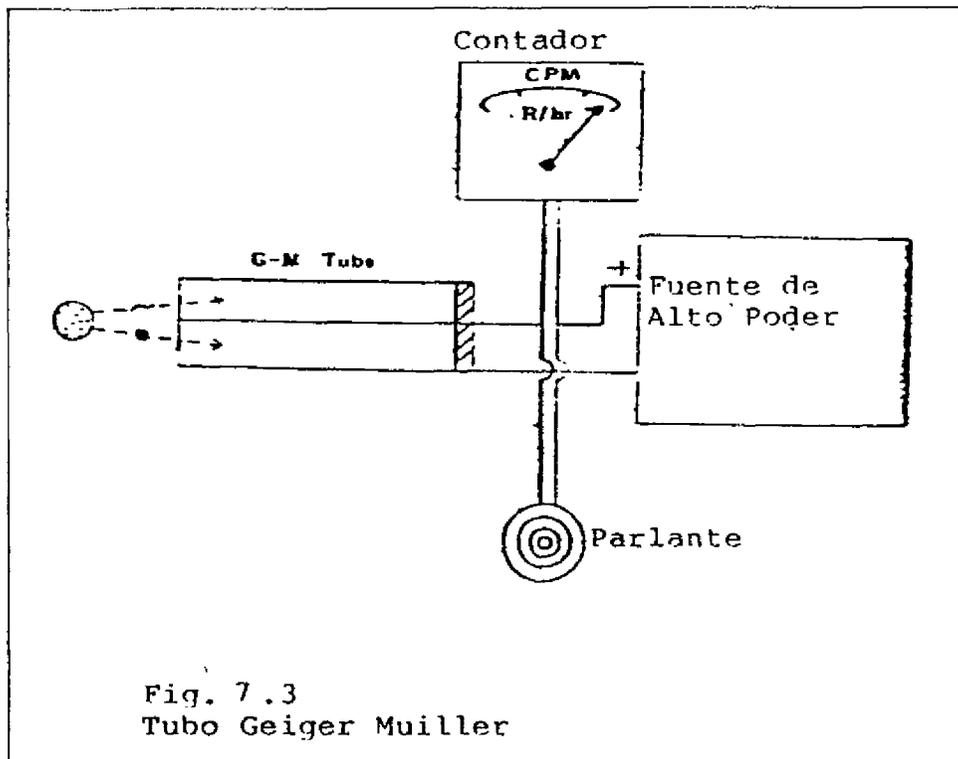


Fig. 7.3  
Tubo Geiger Muller

Cuando algún tipo de radiación ionizante entra en el tubo produce un par iónico: electrón y átomo. Estos serán atraídos a sus respectivos electrodos y contados. Pero algo distinto ocurre en este monitor, el voltaje o bien la fuerza con que atraemos a los iones es muy alta. Este permite que el ion al ir hacia el electrodo sea acelerado y adquiera suficiente energía por él mismo para producir otro efecto de ionización. Este nuevo electrón también adquiere suficiente energía y produce otra ionización. Este proceso se repite varias veces produciendo lo que se denomina como una avalancha de electrones. El número de electrones que llegan al electrodo es muchas veces mayor que anteriormente. Este conjunto de electrones produce un pulso eléctrico en el circuito. Una característica muy importante de un GM es que el pulso eléctrico es bastante grande y no requiere casi de ninguna amplificación. No se necesita conectar ningún electrómetro, reduciendo así considerablemente el costo del aparato. Ahora el número de pulsos es proporcional al número de radiaciones ionizantes iniciales.

Un detector tipo GM no es muy eficiente para detectar fotones gamma, pues estos fácilmente atraviesan el tubo sin producir ninguna ionización. Pero es un instrumento muy útil cuando se trata de medir bajos niveles de radiación, pues responde prácticamente a la presencia de fotones individuales.

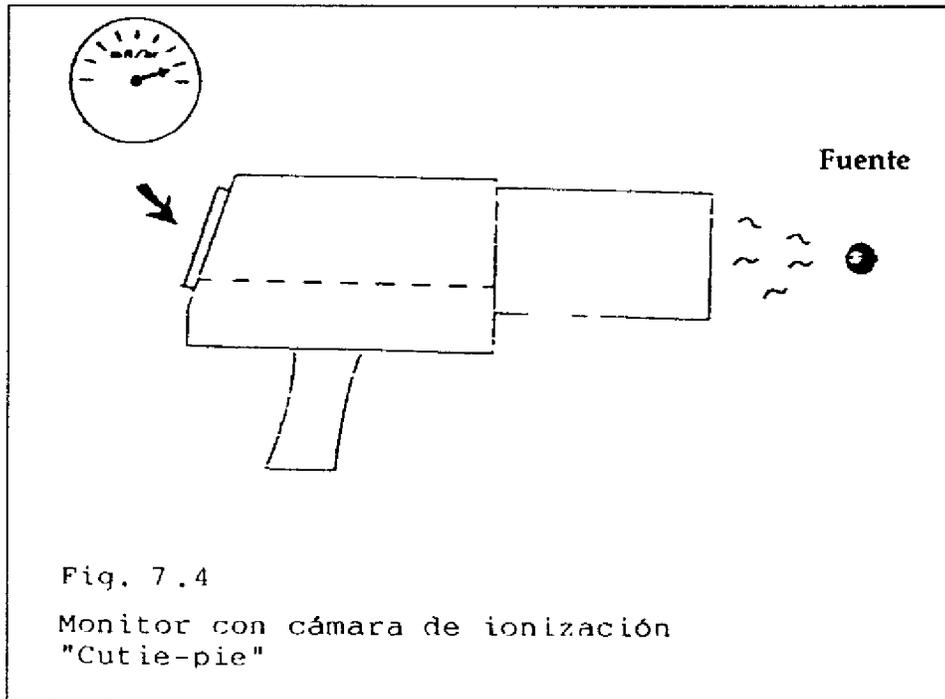
Para medir la radiación beta (electrones) el GM está diseñado con una ventana muy delgada por la cual puede penetrar la radiación beta. De otro manera sería totalmente detenida en las paredes del tubo.

Los pulsos provenientes del GM se pueden contar de dos maneras. La primera es utilizando el micrófono incorporado que nos brinda una señal auditiva muy conveniente. Pero también se puede hacer uso de un contador de pulsos y obtener una respuesta en cuentas por minuto (cpm) o mR/hr.

También el tubo GM tiene una dependencia en energía lo cual dificulta su uso, pero en general es liviano, fácil de manejar, relativamente barato y detecta bajos niveles de radiación. (Dependencia en energía significa que para diferentes valores de energía se comporta diferentemente).

#### CAMARAS DE IONIZACION:

Esta cámara de ionización trabaja igual a la cámara que describimos al principio, solo que este instrumento es portátil y no tiene un electrómetro para que amplifique la señal. La corriente que se produce es muy pequeña y necesita de algún tipo de amplificación electrónica pero no muy sofisticada. Cuando el instrumento está calibrado obtenemos una respuesta en mR/hr. Para ser un monitor de inspección tiene la desventaja sobre el GM en que generalmente es menos sensitivo y no detecta bajos niveles de exposición, pero aún así es un instrumento más preciso y exacto cuando mide las radiaciones ionizantes.



Un diseño típico de este instrumento se muestra en la fig. 7.4 y se le conoce como "Cutie-pie".

## PELICULAS.

Debido a los cambios químicos que se producen en una película sensible a la radiación podemos determinar la intensidad de este campo de radiación. Al incidir la radiación sobre una película radiográfica, su grado de oscurecimiento será proporcional a la cantidad de radiación recibida. Este método es muy utilizado en dosimetría personal, o sea medición de la radiación que reciben los trabajadores que trabajan con radiaciones. Estas películas se ponen en un porta películas que a su vez se coloca en la ropa del individuo expuesto. Conforme él recibe radiación, la película que porta se irá oscureciendo más y más. Generalmente estos dosímetros se cambian cada mes. El gran inconveniente que tienen es que no deben utilizarse en climas húmedos pues la humedad hace que la señal registrada en la película decaiga al transcurrir el tiempo, dando así una lectura por debajo del valor real.

## TERMOLUMINISCENCIA

El proceso de termoluminiscencia es aquel en el cual algunos materiales irradiados al ser calentados emiten luz visible. Algunos materiales termoluminiscentes pueden ser utilizados como dosímetros debido a que la cantidad de luz que emiten es proporcional a la cantidad de radiación recibida.

Una explicación muy simplificada de lo que está ocurriendo es la siguiente. Después de una interacción las radiaciones ionizantes transfieren su energía a algunos electrones del material. Estos electrones son arrancados del átomo, quedando libres en el cristal. El cristal contiene algo así como huecos a donde el electron puede caer y quedar atrapados por largos períodos de tiempo. La cantidad de huecos que contenga el material, es una alteración al cristal hecha por el hombre, pues las diferentes impurezas que ponga el fabricante en el cristal le daran características únicas al dosímetro. Al calentar estos cristales, la energía térmica que le entregamos es capaz de liberar a los electrones que se encuentran atrapados. Al volver el electrón a formar parte de un átomo libera su exceso de energía en forma de luz visible. Si construimos todo un aparato capaz de contar estos fotones de luz visible podremos relacionarlos con el número inicial de radiaciones ionizantes que llegaron al material.

Los materiales termoluminiscentes más utilizados son el fluoruro de litio y el fluoruro de calcio. Las formas en que se manejan son diversas, por ejemplo el cristal puede venir en forma de pastilla, polvo, alambre, o bien un "cristalito".

Las ventajas de los dosímetros termoluminiscencia (TLD) son importantes. Los TLD pueden medir en un rango de exposición mayor que las cámaras de ionización. No hay que aplicarles ningún tipo de voltaje para que trabajen. Son livianos y fáciles de manipular. Su señal no decae con el tiempo como lo hace en una cámara de ionización ni se ve afectada por la humedad como en las películas. Es ideal para medir las exposiciones ocupacionales o ambientales. Se comporta casi como lo hace el tejido humano a las radiaciones, así que es fácil convertir su señal a dosis absorbida en tejido blando. El único problema de los TLD es su dependencia a la energía del haz de radiaciones.

## DETECTORES DE CENTELLEO

Un centelleo es un destello de luz. En un detector de centelleo, las radiaciones ionizantes (generalmente fotones gamma) son absorbidas por un cristal que convierte esa energía depositada en un destello de luz. La luz del cristal entra a un tubo multiplicador, que tiene como función convertir el destello luminoso en una señal eléctrica amplificada (multiplicada) . Después del tubo multiplicador, la señal pasa por un amplificador para aumentar considerablemente el tamaño del pulso. Luego este pulso entra a un analizador de alturas de pulsos. La altura del pulso es proporcional a la energía del fotón incidente. En el analizador de pulsos se pueden contar los pulsos que tengan solo cierta altura (cierta energía) y eliminar así pulsos que provienen de radiaciones de fondo o de otros elementos.

Los cristales de centelleo generalmente son de yoduro de sodio activado con talio, NaI (Tl). El cristal debe cumplir dos funciones, absorber los fotones gamma. y convertir su energía en luz visible. Que tantos fotones se absorban marcará la eficiencia del detector, esta eficiencia aumenta con el tamaño del cristal y al disminuir la distancia de separación entre el cristal y la fuente. Este tipo de detectores generalmente son estacionarios, de gran volumen y con una electrónica asociada grande. Pero también existen en el mercado monitores portátiles con detectores de centelleo. Son en apariencia similares a los tubos GM, el cristal hace que ahora el tubo sea más grande, debe tener un pequeño tubo multiplicador y un amplificador. Este tipo de instrumento es superior en precio al GM y es muy eficiente para campos con radiaciones gammas.

### OTROS DETECTORES:

Existen otros tipos de detectores para medir radiaciones ionizantes en investigación o en trabajo rutinario hospitalario. Algunos de ellos serán:

- detectores de semiconductores
- calibradores de dosis
- detectores de pozo
- contadores de centelleo líquido
- contadores proporcionales, etc.

Más información detallada sobre ellos la encontrará en los libros de texto de instrumentación nuclear.